

## 論文の内容の要旨

論文題目	円調和展開と多重極展開の関係と音場再現への応用に関する研究
学位 申請者	堤 公孝

本研究は、複数のスピーカからなるスピーカアレイを用いて所望の音場を任意の場所において再現することを目的とする。例えば、歌舞伎の公演を行っている演舞場において、役者の声や鈴の音、客席からの掛け声をマイクロフォンなどで収録し、遠く離れたサテライト会場において距離や方向などを忠実に再現しながら収録音響信号を再生できれば、サテライト会場にいる観客はまるで演舞場に潜り込んだような臨場感や一体感が得られると考える。本研究では、単に音響信号を再生するだけでなく前後左右に動きまわる音源の位置や音の伝搬方向といった空間情報をも再現することを目的とし、基本手法として波面合成技術に着目する。

波面合成技術は、多数のスピーカを直線上に並べて構成した直線状スピーカアレイや、スピーカを円上に並べて構成した円状スピーカアレイに対し、スピーカ毎に求めたフィルタ（駆動関数）を入力音響信号に畳み込んで得られる出力信号を与えることで、所望の音場を再現する。この波面合成技術では、音源の左右の動きだけでなく物理的なスピーカ位置よりも前方の受聴者側に飛び出すような奥行き方向の動きも再現できることが知られており、従来の音響再生技術と比較した際の特徴のひとつとなっている。さらに、人の発話や楽器などには音の放射指向特性（音が特定の方向にのみ強く伝搬するといった、音の強弱に関する方向依存性）があるため、奥行き方向の制御に加えて音源の指向特性も再現することが音環境の再現性の向上には重要となる。波面合成技術を基盤として音源の指向特性を再現する研究についても従来から検討が進められてきているが、音源が回転したり平行移動したりする際の駆動信号の更新に多くの演算量を必要とし、また再現性も低下するといった課題があった。

そこで、本研究においては、演算量を抑えながら所望の指向特性を再現することに主眼を置き、スピーカアレイで生成した焦点音源を仮想的なスピーカ（仮想音源）とみなし、この焦点音源で生成した仮想音源を複数準備し、これに独立に駆動信号を与える手法を検討する。本手法では指向性音源の回転や平

行移動による音場の変化を、仮想音源から出力される音響信号は変更せず、仮想音源である焦点音源の位置の更新により実現する。これらの処理は、仮想音源群を新たな仮想スピーカアレイとして捉えていることに相当し、実スピーカアレイの駆動信号の更新に伴う演算量の増加を抑えつつ指向特性が作る音場の再現性を改善することが期待できる。

本論文の構成は以下のとおりである。

1 章では、音源の位置を含めた空間的な情報をスピーカで再現する音響再生の研究を概説し、本研究の位置づけを述べる。2 章では、波面合成技術と指向性制御技術について、所望の音場を再現するため音響信号に畳み込むフィルタ（駆動関数）の導出と従来研究について述べる。また、波面合成と指向制御のフィルタを導出する際に基礎となる平面上の空間フーリエ変換の一つである円調和級数展開と多重極展開について説明する。

3 章では、指向性音源が作る音場を直接的に再現するために、音場を円状に捉えることで円調和級数展開によりモデル化し、直線状スピーカアレイで生成する手法を提案する。円状アレイを用いて指向性音源が作る音場をモデル化することにより、実スピーカアレイの駆動信号を更新するのに必要な演算量を低減できることを示す。

4 章では、指向性音源が作る音場を、無指向性の音源を格子状に密な間隔で並べてできる多重極音源によりモデル化し、直線上スピーカアレイで生成する手法を提案する。多重極音源の重ね合わせにより音場をモデル化することにより、特に低次の多重極音源で表現可能な指向特性について、実スピーカアレイの駆動信号の更新に必要な演算量を低減できることを示す。

5 章では、従来研究において関係性が指摘されながらも陽に示されることがなかった円調和級数展開と多重極展開の間の解析的關係について考察し、所望の指向性音源が作る音場をモデル化した円調和展開係数を多重極展開係数に解析的に変換できることを示す。また、解析的変換で得られた多重極展開係数を用いて4 章で示した方法で、指向特性を持つ音源を含んだ音場を再現できることを示す。

6 章は結論であり、本研究の全体のまとめ、および研究の意義と貢献をまとめる。

## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 堤 公孝

審査委員主査 羽田 陽一

委員 梶本 裕之

委員 広田 光一

委員 高橋 裕樹

委員 野村 英之

堤公孝君提出の学位論文「円調和展開と多重極展開の関係と音場再現への応用に関する研究」は、收音場における音響情報のうち従来から再現されてきた音源位置や方向情報のみならず、音源の持つ指向特性までも再現することによって高精度な音場再現を低演算量で実現することを目的とし、スピーカアレイで実現可能な焦点音源を複数組み合わせることで指向特性を再現すること、およびスピーカアレイに与える駆動信号を解析的に求める方法を提案したものであり、全6章から構成される。

これまでの音場再現技術として波面合成技術が知られているが、音源の指向特性を再現することも可能ではあったが、音源が回転したり平行移動したりする際の駆動信号の更新に多くの演算量を必要とし、また再現性も低下するといった課題があった。

本研究では、演算量を抑えながら所望の指向特性を再現することに主眼を置き、スピーカアレイで生成した焦点音源を仮想的なスピーカ（仮想音源）とみなし、この焦点音源で生成した仮想音源を複数準備し、これに独立に駆動信号を与える手法に取り組んだ。

第1章では、音源の位置を含めた空間的な情報をスピーカで再現する音響再生の研究を概説し、本研究の位置づけを述べている。

第2章では、波面合成技術と指向性制御技術について、所望の音場を再現するため音響信号に畳み込むフィルタ（駆動関数）の導出と従来研究について述べ、また、波面合成と指向制御のフィルタを導出する際に基礎となる平面上の空間フーリエ変換の一つである円調和級数展開と多重極展開について説明している。

第3章では、指向性音源が作る音場を直接的に再現するために、音場を円状に捉えることで円調和級数展開によりモデル化し、直線状スピーカアレイで生成する手法を提案している。円状アレイを用いて指向性音源が作る音場をモデル化

することにより、実スピーカアレイの駆動信号を更新するのに必要な演算量を低減できることを示した。

第4章では、指向性音源が作る音場を、無指向性の音源を格子状に密な間隔で並べてできる多重極音源によりモデル化し、直線上スピーカアレイで生成する手法を提案している。多重極音源の重ね合わせにより音場をモデル化することにより、特に低次の多重極音源で表現可能な指向特性について、実スピーカアレイの駆動信号の更新に必要な演算量を低減できることを示した。

第5章では、従来研究において関係性が指摘されながらも陽に示されることがなかった円調和級数展開と多重極展開の間の解析的關係について考察し、所望の指向性音源が作る音場をモデル化した円調和展開係数を多重極展開係数に解析的に変換できることを示した。また、解析的変換で得られた多重極展開係数を用いて第4章で示した方法で、指向特性を持つ音源を含んだ音場を再現できることを示した。

6章は結論であり、本研究の全体のまとめ、および研究の意義と貢献をまとめている。

以上、堤公孝君提出の学位論文は、高精度な音場再現において重要となる音源の持つ指向特性を低演算量で実現するための技術を提案したものであり、仮想焦点音源を円調和展開と多重極展開の2つの展開形式にて構成する方法およびそれらの関係性を明らかにした点で極めて先駆的である。またその関連技術は、すでに実装され実環境で動作しており、本技術の投入によりさらなる社会的なインパクトが期待されている。

よって、学術上・産業上寄与することが大きく、学位論文としてふさわしい内容であるため、本審査委員会は、本論文は博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有するものと認める。